

## 基于主成分分析的高炉操作炉型评价

闫炳基, 张建良, 国宏伟, 曹英杰  
(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 针对目前高炉操作炉型管理模型中存在用于评价炉型的指标多且重叠性大的问题, 提出一种基于主成分分析的改进方法. 该方法能够从传统评价炉型的指标(焦比、煤比、综合焦比、利用系数及铁水硅含量)中生成3个核指标, 新的核指标空间相互独立, 且能够代表原有的指标, 从而解决了指标多且重叠性大的问题. 在国丰1号1780 m<sup>3</sup>高炉, 开发应用了该改进的高炉操作炉型模型, 确定了该高炉的主要操作炉型类别并对其进行评价.

**关 键 词:** 操作炉型; 聚类; 生产指标; 主成分分析; 综合评价

**中图分类号:** TF 543.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2015)07-0952-05

## Evaluation of Blast Furnace Operation Profile Based on Principal Component Analysis (PCA)

YAN Bing-ji, ZHANG Jian-liang, GUO Hong-wei, CAO Ying-jie

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Corresponding author: GUO Hong-wei, E-mail: ghwustb@gmail.com)

**Abstract:** Aiming at solving the existing problems that there are many indexes used in operation profile evaluation and there are many overlaps among them, an improved method based on principal component analysis (PCA) was proposed. The method can generate three new core indicators from traditional indexes in operation profile evaluation (coke ratio, coal ratio, comprehensive coke ratio, utilization coefficient and the silicon content in hot metal). The new core indicators are independent of each other in space, and can represent the original ones. The above problems are thus solved. The improved model of operation profile evaluation was developed and applied to No. 1 1780 m<sup>3</sup> blast furnace in Guofeng Steel, and the main categories of operation profile of the blast furnace were determined and evaluated.

**Key words:** operation profile; clustering; production indexes; principal component analysis; comprehensive evaluation

高炉操作炉型指的是在高炉正常操作时, 高炉内侧炉墙工作面的工作状况. 维持正常、合理的操作炉型, 对高炉的优质、高产、低耗、长寿有着决定性的意义<sup>[1-3]</sup>.

目前对于操作炉型管理模型的研究方法有:

1) 专家系统推测法. 通过对高炉炉衬破损的实际调查, 结合高炉操作和检测条件建立炉体状态模型, 可以在线监测和判断炉衬破损状况, 并根据判断结果调用知识库中的操作知识对高炉进行

指导, 以及时调整操作, 维持合理的操作炉型<sup>[4]</sup>. 该方法依赖于专家规则, 对于不同高炉规则需要调整适应.

2) 传热模型仿真法. 利用传热模型反推计算, 建立二维或三维铜冷却壁高炉操作炉型管理模型, 利用有限元等计算分析方法, 可对铜冷却壁热面渣皮厚度进行实时计算, 实现操作炉型管理<sup>[5-8]</sup>. 该方法中涉及的煤气流速、煤气温度、渣皮物性参数等条件不易确定.

收稿日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204013).

作者简介: 闫炳基(1987-), 男, 河南平顶山人, 北京科技大学博士研究生; 张建良(1965-), 男, 天津人, 北京科技大学教授, 博士生导师.

3) 数据挖掘分析法. 通过对高炉炉身、炉腰、炉腹冷却壁热电偶温度值进行数据挖掘,并结合高炉的生产技术指标,确立操作炉型类别及其评价,具体的算法有自组织特征映射(SOFM)、神经网络及聚类算法等<sup>[9-10]</sup>. 该方法存在用于评价炉型的指标多且重叠性大的问题,而且其中的神经网络方法解释性较差,SOFM 分类能力较差.

针对当前研究现状,本文首先采用 TwoStep 算法<sup>[11]</sup>对高炉操作炉型进行聚类分析;然后采用主成分分析方法<sup>[12]</sup>,从传统评价炉型的指标(焦比、煤比、综合焦比、利用系数及铁水硅含量)中,生成 3 个新的核指标,并应用该核指标对聚类结果评价;最后在国丰 1 号 1 780 m<sup>3</sup> 高炉应用了该

改进的高炉操作炉型模型.

1 炉型聚类

以国丰 1 号 1 780 m<sup>3</sup> 高炉现场收集的 2012 年 8 月 1 日到 2013 年 1 月 6 日高炉 6,7,8,9,10,11,13 和 14 段冷却壁检测的 2 615 条历史温度数据为基础(其中考虑到数据缺失和中途休风等影响,已将无效数据去除),采用 TwoStep 算法,并运用后台软件对其进行操作炉型聚类,聚类结果分为 12 类,每一类各段冷却壁温度的平均值分布如表 1 所示.

表 1 聚类结果每一类各段的温度平均值  
Table 1 Average temperature of each section in each clustering result °C

类别	第 6 段	第 7 段	第 8 段	第 9 段	第 10 段	第 11 段	第 13 段	第 14 段
第 1 类	51.20	50.43	59.46	63.61	191.88	183.72	104.09	82.29
第 2 类	53.70	55.81	66.07	65.50	170.38	152.06	92.82	71.58
第 3 类	49.38	44.09	49.11	57.27	190.78	189.11	104.81	84.89
第 4 类	48.15	44.58	48.65	55.71	140.69	145.63	91.83	71.59
第 5 类	47.80	42.61	46.62	52.19	77.53	89.64	77.36	71.90
第 6 类	48.95	48.76	56.99	57.72	148.00	146.26	89.21	67.18
第 7 类	46.66	37.84	49.76	56.72	186.83	178.05	95.15	68.65
第 8 类	49.24	49.88	51.11	58.69	175.04	171.68	98.72	75.53
第 9 类	52.00	46.32	52.30	55.94	98.43	106.53	79.64	66.60
第 10 类	55.47	51.89	57.65	59.54	114.29	116.31	83.40	69.66
第 11 类	45.33	38.27	49.88	54.53	141.11	147.42	84.63	63.21
第 12 类	48.40	42.78	46.77	49.73	71.90	71.31	61.33	49.50

针对分类情况,将温度趋势相近的曲线进行再次分类,最终得到 8 类聚类结果,如图 1 所示. 在该聚类结果中,类别 1 对应前述类别 12,类别 2 对应之前的类别 5,类别 3 对应之前的类别 9,类

别 4 对应之前的类别 10,类别 5 是之前的类别 4,6,11 归类的结果,类别 6 对应之前的类别 2,类别 7 对应之前的类别 8,新类别 8 是之前的类别 1,3,7 归类的结果.

用高炉冷却壁温度沿高炉高度方向的分布作为炉型波动及变化的参考,将聚类时间段内,高炉焦比、煤比、综合焦比、利用系数以及铁水中硅含量进行统计,统计结果如表 2 所示.

2 主成分分析

以国丰 1 号 1 780 m<sup>3</sup> 高炉专家系统操作炉型管理模型为平台,运用后台软件对聚类结果对应指标进行主成分分析评价,具体步骤如下:

1) 将每一类炉型相对应的生产指标进行标准化采集,得到指标间的相关系数矩阵,如表 3 所示.

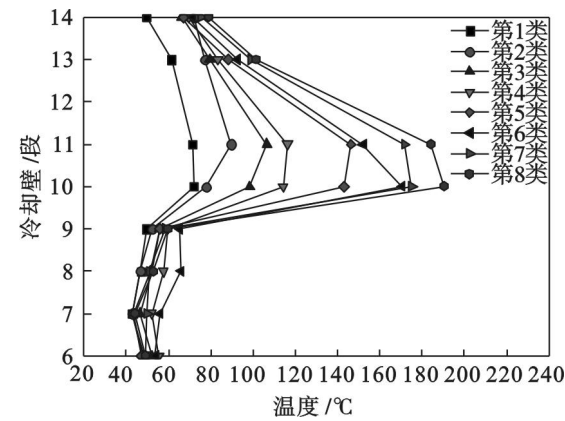


图 1 重新聚类后每一类各段的温度平均值分布  
Fig. 1 Average temperature distribution of each section in each result after re-clustering

表 2 各类操作炉型对应主要操作指标情况  
Table 2 Main operation indexes corresponding to operation profiles

类别	焦比 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	煤比 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	综合焦比 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	利用系数 $\text{t}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$	w(Si) %
第 1 类	378.19	164.83	526.54	2.535	0.347
第 2 类	353.84	166.00	503.24	2.554	0.402
第 3 类	358.52	164.65	506.70	2.600	0.371
第 4 类	357.89	165.07	506.45	2.607	0.370
第 5 类	351.37	164.85	499.74	2.521	0.362
第 6 类	352.96	166.51	502.81	2.586	0.334
第 7 类	342.24	166.33	491.94	2.529	0.355
第 8 类	349.41	163.65	496.70	2.490	0.371

表 3 相关系数矩阵  
Table 3 Correlation coefficient matrix

指标	焦比	煤比	综合焦比	利用系数	w(Si)
焦比	1.000	-0.269	0.997	0.200	-0.170
煤比	-0.269	1.000	-0.189	0.352	-0.201
综合焦比	0.997	-0.189	1.000	0.234	-0.191
利用系数	0.200	0.352	0.234	1.000	-0.026
w(Si)	-0.170	-0.201	-0.191	-0.026	1.000

求解指标样本相关系数矩阵,得到其特征值和累积贡献率,如表 4 所示.由于特征值可以被看成是表示主成分影响力大小的指标,特征值越大说明该主成分的解释力度就越大,故而在表 4 中列出所提取的相应特征值较大的前 5 个成分.

表 4 方差分解主成分提取分析表  
Table 4 Analysis of principal component extraction by variance decomposition

提取成分	特征值	方差/%	累积贡献率/%
1	2.169	43.383	43.383
2	1.416	28.321	71.703
3	0.974	19.472	91.176
4	0.441	8.824	100
5	2.09E-08	4.18E-07	100

主成分个数提取原则是按照主成分对应的累积贡献率大于 85% 提取,由表 4 中累积贡献率可知,前 3 个主成分的累积贡献率已达到 91.176%,且其特征值较大,故而确定主成分数值为 3,并通过计算得到 3 个主成分中每个指标的载荷,如表 5 所示.

表 5 初始因子载荷矩阵  
Table 5 Loading matrix of initial factors

指标	主成分		
	1	2	3
焦比	0.988	-0.088	0.034
煤比	-0.251	0.861	-0.017
综合焦比	0.985	-0.017	0.033
利用系数	0.297	0.703	0.521
w(Si)	-0.268	-0.416	0.836

由表 5 可知:

主成分 1 中焦比、综合焦比有较高载荷且正相关,说明该主成分指标代表了高炉的燃耗综合指标,因此,该主成分指标越低越好;

主成分 2 中煤比、利用系数有较高载荷且正相关,说明该主成分指标代表了高炉喷煤量和效率的综合指标,因此,该主成分指标越高越好;

主成分 3 中铁水硅含量有较高载荷且正相关,说明该主成分指标代表了高炉热状态的指标,因此,该主成分指标越低越好.

综上,提取这 3 个主成分作为新的核指标,可以基本反映全部指标的信息.

2) 将每项指标的数值标准化,标准化后各项指标对应情况如表 6 所示.

表 6 各项指标标准化后对应情况  
Table 6 Indicators after standardization

类别	焦比 $X_1$	煤比 $X_2$	综合焦比 $X_3$	利用系数 $X_4$	铁水硅含量 $X_5$
第 1 类	2.160 05	-0.418 26	2.166 96	-0.426 80	-0.842 22
第 2 类	-0.163 41	0.786 33	-0.099 71	0.030 06	1.882 60
第 3 类	0.283 16	-0.603 58	0.236 88	1.136 12	0.346 79
第 4 类	0.223 04	-0.171 16	0.212 56	1.304 43	0.297 25
第 5 类	-0.399 09	-0.397 67	-0.440 20	-0.763 42	-0.099 08
第 6 类	-0.247 37	1.311 40	-0.141 55	0.799 49	-1.486 26
第 7 类	-1.270 27	1.126 08	-1.199 00	-0.571 06	-0.445 88
第 8 类	-0.586 11	-1.633 14	-0.735 94	-1.508 81	0.346 79

3) 计算得出 3 个核指标与 5 个评价指标的关系表达式,见式(1)~式(3),其中  $F_1$  代表核指标一,  $F_2$  代表核指标二,  $F_3$  代表核指标三,  $X_i$  为评价指标  $i$  标准化后的数值:

$$F_1 = 0.671X_1 - 0.170X_2 + 0.669X_3 + 0.202X_4 - 0.182X_5, \tag{1}$$

$$F_2 = -0.074X_1 + 0.724X_2 - 0.014X_3 + 0.591X_4 - 0.350X_5, \tag{2}$$

$$F_3 = 0.034X_1 - 0.017X_2 + 0.033X_3 + 0.528X_4 + 0.847X_5. \tag{3}$$

通过计算,得到 8 类操作炉型的  $F_1 \sim F_3$  值及其排名,并以每个核指标所对应的特征值占所提取核指标总的特征值之和的比例作为权重,综合每个核指标中各类炉型的排名,计算得到最终排名,如表 7 所示。

表 7 综合主成分值							
Table 7 Comprehensive principal component values							
类别	$F_1$	排名	$F_2$	排名	$F_3$	排名	综合排名
第 1 类	3.04	8	-0.45	6	-0.79	2	8
第 2 类	-0.65	3	-0.06	5	1.59	8	4
第 3 类	0.62	7	0.09	4	0.92	6	7
第 4 类	0.53	6	0.52	3	0.96	7	6
第 5 类	-0.63	4	-0.67	7	-0.51	5	5
第 6 类	-0.05	5	1.96	1	-0.87	1	2
第 7 类	-1.88	1	0.74	2	-0.78	3	1
第 8 类	-0.98	2	-2.14	8	-0.52	4	3

根据排名评定操作炉型优劣,并根据  $F_1 \sim F_3$  的各自排名进行操作炉型描述,则得到最终操作炉型的综合评价,如表 8 所示。

表 8 各个操作炉型的综合评价	
Table 8 Comprehensive evaluation of operation profile	
类别	炉型评价
1	炉型最差,燃耗最高,利用系数和喷煤量较低,高炉热状态较好
2	炉型一般,燃耗较低,利用系数和喷煤量一般,高炉热状态最差
3	炉型较差,燃耗较高,利用系数和喷煤量一般,高炉热状态较差
4	炉型较差,燃耗较高,利用系数和喷煤量较高,高炉热状态较差
5	炉型一般,燃耗一般,利用系数和喷煤量较低,高炉热状态一般
6	炉型较优,燃耗一般,利用系数和喷煤量最高,高炉热状态最好
7	炉型最优,燃耗最低,利用系数和喷煤量较高,高炉热状态较好
8	炉型较优,燃耗较低,利用系数和喷煤量最低,高炉热状态一般

3 模型在线运行情况分析

以国丰 1 号 1780 m<sup>3</sup> 高炉操作炉型管理模型为平台,将上述聚类结果在该模型上进行更新,并依据模型在线运行情况,对聚类评价结果进行验证.图 2 中显示的是 2013 年 3 月 13 日 7 时至 2013 年 3 月 14 日 21 时共 38 h 的操作炉型变化。

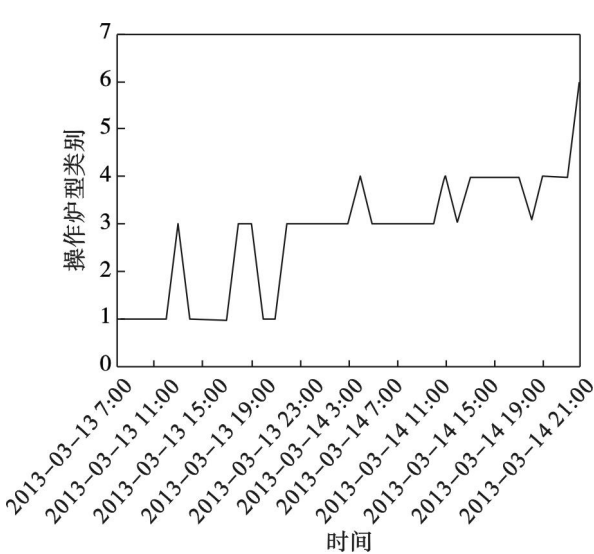


图 2 操作炉型变化  
Fig. 2 Evolution of operation profile

由图 2 可以看出,在这段时间开始阶段,截止到 3 月 13 日 22 时,操作炉型变化主要集中在第 1 和第 3 类炉型.由上述基于主成分分析的聚类结果可知,这两类炉型下的高炉生产各项指标较差,主要体现在:生产燃耗高,利用系数和喷煤量较低,高炉热状态波动较大。

结合生产情况,将 3 月 13 日前的平均生产指标及 3 月 13 日的生产指标进行对比,如表 9 所示。

表 9 2013 年 3 月 1 日 ~12 日高炉平均生产指标及 13 日生产指标对比						
Table 9 Comparison of production indexes between March 13 and the average of March 1 to 12 in 2013						
对比日期	焦比 kg·t <sup>-1</sup>	煤比 kg·t <sup>-1</sup>	综合焦比 kg·t <sup>-1</sup>	利用系数 t·m <sup>-3</sup> ·d <sup>-1</sup>	w(Si) %	
平均	329.21	165.59	478.23	2.664	0.350	
13 日	332.42	162.78	478.91	2.575	0.450	

由表 9 可知,实际生产指标与评价结果一致,证明了基于主成分分析的炉型评价结果的准确性.同时,根据操作炉型管理模型给出的指导,相应地从燃料性质以及应对异常炉况的措施方面进行改变。

由图 2 中炉型变化的后半段可知,现场采取措施之后,炉型向较优炉型转变:2013 年 3 月 14 日 3 时开始出现第 4 类炉型,炉况开始好转,同日 12 时后炉型主要集中在第 5、第 6 类炉型,且生产指标变好趋势显著,如表 10 所示.证明了基于主成分分析的聚类结果对于生产具有一定的指导意义。



表 10 2013 年 3 月 1 日 ~12 日高炉平均生产指标及 14 日生产指标对比

Table 10 Comparison of production indexes between March 14 and the average of March 1 to 12 in 2013

对比日期	焦比 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	煤比 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	综合焦比 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	利用系数 $\text{t} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$	$w(\text{Si})$ %
平均	329.21	165.59	478.23	2.664	0.350
14 日	323.20	162.68	469.62	2.573	0.348

## 4 结 论

1) 通过主成分分析得到的 3 个主成分作为新的核指标,其能够代替原有全部指标且彼此间相互独立,解决了指标众多且重叠性大的问题。

2) 研究过程中发现,分析得到的 3 个核指标分别都有其代表的特殊意义:核指标一中焦比、综合焦比载荷较高,该主成分指标代表了高炉的燃耗综合指标;核指标二中煤比、利用系数载荷较高,该主成分指标代表了高炉喷煤量和效率的综合指标;核指标三中铁水中硅含量载荷较高,该主成分指标代表了高炉热状态的指标。

3) 通过国丰 1 号 1 780  $\text{m}^3$  高炉操作炉型应用分析得出,当出现较差炉型时,依据模型指导的相应措施,使高炉炉型向较优炉型转变,且生产指标变好趋势显著,证明基于主成分评价的高炉操作炉型管理模型对实际生产具有正确的指导作用。

### 参考文献:

- [1] Inada T, Takatani K, Takata K, et al. The effect of the change of furnace profile with the increase in furnace volume on operation[J]. *ISIJ International*, 2003, 43(8): 1143 – 1150.
- [2] Kholzakov V I, Bratchenko V P, Ostroukhov M Y, et al. The effect of the working profile of the blast furnace on the distribution of gas streams[J]. *Metallurgist*, 1963, 7(8): 341 – 344.
- [3] Ichida M, Nishihara K, Tamura K, et al. Influence of inner wall profile on descending and melting behavior of burden in blast furnace[J]. *ISIJ International*, 1991, 31(5): 515 – 523.
- [4] 陈令坤, 左海滨, 于仲洁, 等. 高炉冶炼专家系统的开发研究[J]. *钢铁*, 2006, 41(1): 14 – 18.  
(Chen Ling-kun, Zuo Hai-bin, Yu Zhong-jie, et al. Development of expert system on blast furnace[J]. *Iron and Steel*, 2006, 41(1): 14 – 18.)
- [5] 车玉满, 孙鹏, 李连成, 等. 鞍钢铜冷却壁高炉操作炉型管理模型开发与应用[J]. *炼铁*, 2007, 26(5): 18 – 21.  
(Che Yu-man, Sun Peng, Li Lian-cheng, et al. The development and application of the inner profile management model in Angang's BF lined with the copper stove[J]. *Ironmaking*, 2007, 26(5): 18 – 21.)
- [6] Zagaria M, Dimastromatteo V, Colla V. Monitoring erosion and skull profile in blast furnace hearth[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2010, 37(3): 229 – 234.
- [7] Zhang Y, Deshpande R, Huang D, et al. Numerical analysis of blast furnace hearth inner profile by using CFD and heat transfer model for different time periods[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(1/2): 186 – 197.
- [8] Brännbacka J, Saxén H. Model for fast computation of blast furnace hearth erosion and buildup profiles[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(20): 7793 – 7801.
- [9] García F A, Campoy P, Mochón J, et al. A new “user-friendly” blast furnace advisory control system using a neural network temperature profile classifier[J]. *ISIJ International*, 2011, 50(5): 730 – 737.
- [10] Saxena C, Prasad S, Lavanya A, et al. Classification of above burden profile using SOM and *k*-means [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2007, 34(1): 5 – 9.
- [11] 曹英杰, 张建良, 国宏伟, 等. 基于 TwoStep 算法的国丰 1 号高炉操作炉型聚类分析与应用[J]. *钢铁*, 2013, 48(10): 17 – 22.  
(Cao Ying-jie, Zhang Jian-liang, Guo Hong-wei, et al. Clustering analysis and application of operative profile in Guofeng No. 1 blast furnace based on the algorithm of TwoStep[J]. *Iron and Steel*, 2013, 48(10): 17 – 22.)
- [12] Guo H W, Su B X, Zhang J L, et al. Extracting the core indicators of pulverized coal for blast furnace injection based on principal component analysis[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, 20(3): 246 – 252.